

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ И ВЕКТОРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ КОРОНЧАТОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОБРАБОТКИ ЗАБОЯ

Гуляев В.Г., докт. техн. наук, Семенченко Д.А., аспирант
Донецкий национальный технический университет

Разработана математическая модель для определения удельных энергозатрат и составляющих вектора внешнего возмущения при разрушении массива аксиальной коронкой проходческого комбайна. Модель учитывает схему и режим обработки забоя, форму коронки и схему набора режущего инструмента.

The mathematical model for definition of specific power inputs and component of the vector of external disturbing at the destruction of massif by heading machine with an axial bit is developed. The model takes into account the scheme and mode of processing of working face, form of the bit and the lacing pattern of the cutting tool.

В настоящее время на горнодобывающих предприятиях Украины и за рубежом широко используются проходческие комбайны избирательного действия, оснащенные аксиальными коронками. Эффективность работы таких комбайнов в значительной степени определяется параметрами коронки и привода исполнительного органа.

Необходимость повышения технического уровня отечественных проходческих комбайнов типа П110, П220 и других с целью дальнейшего обеспечения их высокой конкурентоспособности делают актуальной задачу оптимального выбора параметров аксиальной коронки. Успешное решение этой задачи может быть достигнуто на основе разработки математической модели, оптимизирующей параметры коронки и позволяющей широко использовать компьютерные технологии на стадии модернизации этих машин или проектирования аналогичных.

Создание такой модели требует обоснования и разработки целевых функций и функций ограничений с учетом особенностей разрушения массива аксиальной коронкой в процессе обработки забоя в пределах полного цикла.

Это обуславливает необходимость выявления возможных режимов обработки забоя и требует разработки математической модели оп-

ределения удельных энергозатрат и формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке во всех возможных режимах ее работы.

На рисунке 1 приведена типовая схема обработки забоя проходческим комбайном типа П110. Анализ этой схемы показывает, что полный цикл обработки поверхности забоя включает значительное количество (в рассматриваемом случае их 13) последовательных операций – зарубка, боковые резы влево и вправо, резы с подъемом и опусканием коронки.

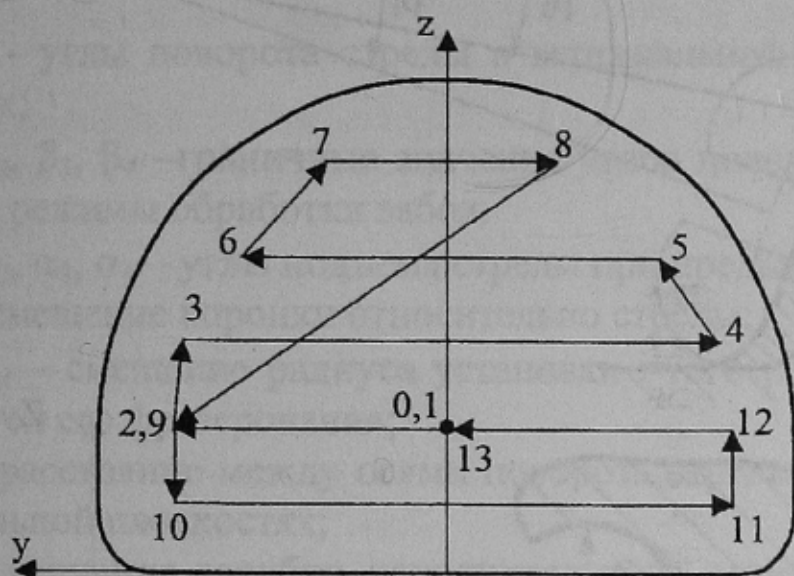


Рисунок 1 - Схема обработки забоя

Каждая из этих операций характеризуется своей отличной от других конфигурацией и площадью обрабатываемого сечения.

Разработанная расчетная схема к определению удельных энергозатрат и составляющих вектора внешнего возмущения формируемого на аксиальной коронке в различных режимах обработки забоя приведена на рисунке 2.

На этом рисунке показаны:

$VXYZ$ - система координат жестко связанная с пространством выработки;

$VX'Y'Z$ – повернутая система координат $VXYZ$ относительно оси BZ на угол поворота стрелы в горизонтальной плоскости;

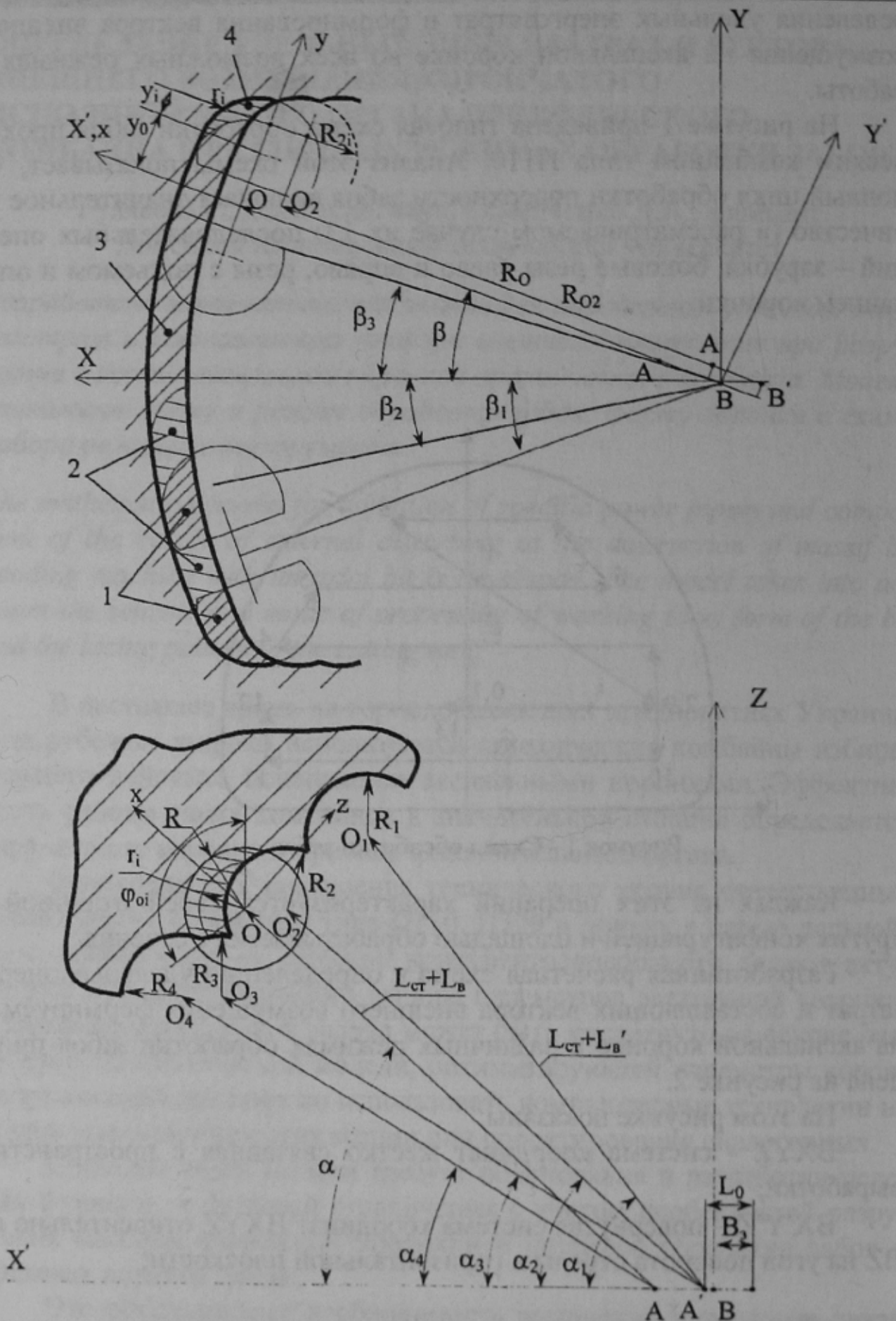


Рисунок 2 – Расчетная схема к определению удельных энергозатрат и вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке

Охуз - система координат жорстко зв'язана з осью вращення коронки и стрелой;

O_1, O_2, O_3, O_4 - центри окружностей, аппроксимирующих поверхность забоя в сечении $X'BZ$;

$R, r_i, R_{2i}, R_1, R_2, R_3, R_4$ - радиусы соответственно коронки, установки i -того резца и образованных поверхностей забоя предыдущими резами;

$L_{ст}$ и L_B, L'_B - длина стрелы и величина ее выдвижения соответственно в текущий момент и момент образования обрабатываемой поверхности забоя;

R_0 и R_{02} - проекции на плоскость XBY вылета стрелы $L_{ст}+L_B$ и $L_{ст}+L'_B$;

α, β - углы поворота стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ - граничные значения углов поворота стрелы, определяющие режимы обработки забоя;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - углы подъема стрелы при предыдущих резах;

y_0 - смещение коронки относительно стрелы;

y_i, φ_{oi} - смещение радиуса установки i -того резца вдоль оси коронки и угол его фрезерования;

L_0 - расстояние между осями поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

B_3 - величина зарубки исполнительного органа в массив вдоль оси BX .

Анализ режимов обработки забоя показывает, что процесс зарубки (см. рисунок 2, рез 1, $\beta = \beta_1$) характеризуется изменением сечения обрабатываемого забоя от нуля до максимальной величины (определяемой возможной глубиной зарубки и профилем коронки), серповидной формой среза на резцах, изменяющимся количеством и радиусом установки резцов, контактирующих с массивом. Этот процесс сопровождается одновременным фрезерованием поверхности забоя внутренними и внешними поверхностями двух коронок.

Боковой рез также характеризуется изменением сечения обрабатываемой поверхности в процессе резания. В этом резе можно выделить следующие режимы:

резание 2-мя коронками с одним и тем же сечением (рез 2, $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$);

резание одной коронкой с постоянным сечением (рез 3, $\beta_2 < \beta < \beta_3$);

резание одной коронкой с изменением сечения обработки забоя (рез 4, $\beta > \beta_3$).

Особенностью последнего режима бокового реза является то, что минимальный радиус установки резцов, контактирующих с забоем, уменьшается, и может достигать малых величин. Это обуславливает существенные кинематические изменения углов таких резцов.

При подъеме и опускании коронки (рез вверх) процесс разрушения массива характеризуется работой двух коронок, серповидной формой среза резцами с изменяющимся углом охвата.

Таким образом, процесс обработки забоя аксиальной коронкой характеризуется:

наличием большого числа возможных режимов обработки забоя; различием формы и площади обрабатываемых сечений в этих режимах;

наличием режимов работы разрушения массива резцами с малым радиусом установки;

существенными кинематическими изменениями углов резцов с малым радиусом установки;

влиянием формы коронки на конфигурацию сечения выработки, получаемого в результате обработки забоя.

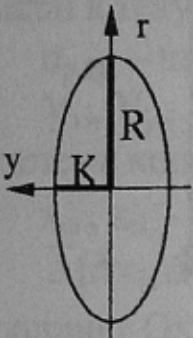
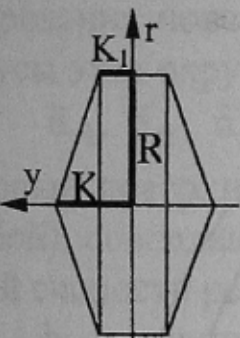
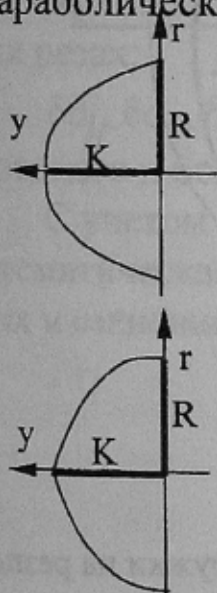
Приведенный анализ применяемых в настоящее время в проходческих комбайнах коронок показал большое разнообразие их форм. С целью оценки влияния формы коронки на эффективность процесса разрушения в различных режимах обработки забоя была выполнена их классификация и разработано их математическое описание (см. таблицу 1). Приведенные в таблице зависимости позволяют определять радиусы установки резца r_i и угол наклона касательной δ_i по известной величине u_i .

На основе ранее выполненного анализа возможных режимов обработки забоя была разработана расчетная схема (рисунок 3) определения толщины стружки и кинематических изменений углов резца.

На рисунке показаны:

Охуз, Ох'y'z', Ох''y''z'' - системы координат положения коронки соответственно в текущий момент резания i -тым резцом t , в момент образования поверхности забоя для i -того резца, предшествующим резцом, находившимся с ним в одной линии резания t' и в момент

Таблица 1 – Зависимость радиуса установки резца r_i и угла наклона касательной к образующей коронки δ_i от осевого смещения y_i

Форма коронки	Параметры формы коронки	Зависимости $r_i = f(y_i)$ $\delta_i = -\arctg(f'(y_i))$
<p>Эллипсоидальная</p> 	<p>R K</p>	$r_i = R \sqrt{1 - \frac{y_i^2}{K^2}}$ $\delta_i = \arctg \frac{R^2 y_i}{K^2 r_i}$
<p>Трапецеидальная</p> 	<p>R K K₁</p>	<p>при $y_i \leq K_1$ $r_i = R$ $\delta_i = 0$ при $K_1 \leq y_i \leq K$ $r_i = \frac{R}{K - K_1} (K - y_i) \frac{y_i}{ y_i }$ $\delta_i = \frac{y_i}{ y_i } \arctg \frac{R}{K - K_1}$</p>
<p>Параболическая</p> 	<p>R K</p>	$r_i = R \sqrt{1 - \frac{y_i}{K}}$ $\delta_i = \arctg \frac{R^2}{2K \cdot r_i}$ $r_i = R - \frac{R}{K^2} y_i^2$ $\delta_i = \arctg \frac{2R \cdot y_i}{K^2}$

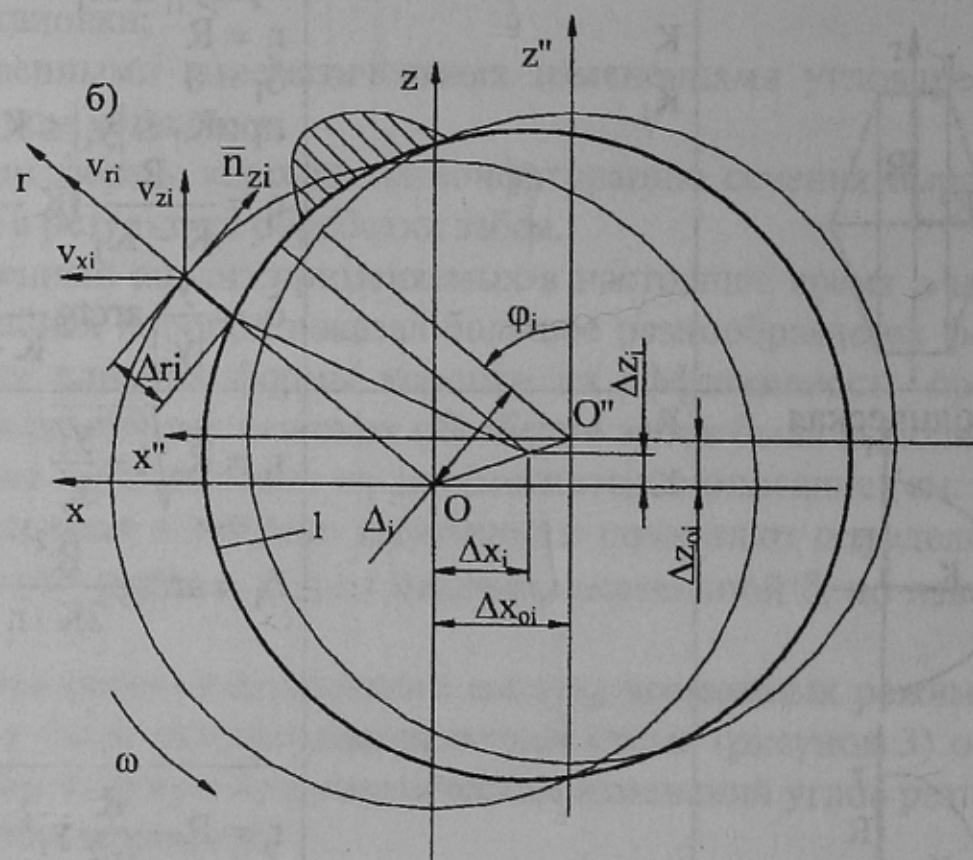
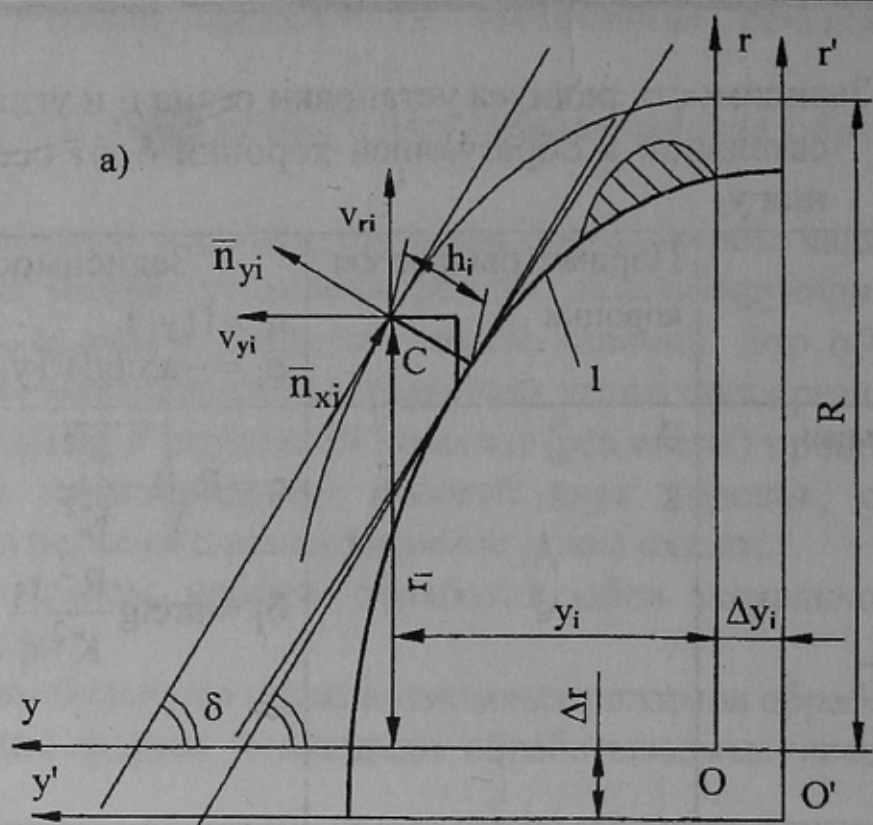


Рисунок 3 - Расчетная схема для определения толщины стружки на резце аксиальной коронки и кинематических изменений его углов

времени t'' , когда угол поворота этого предшествующего резца равен углу текущего положения резца φ_i ;

V_B – скорость выдвижения стрелы;

ω – угловая скорость вращения коронки;

C – точка вершины i -того резца;

$\omega_\beta, \omega_\alpha$ – угловые скорости поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

$\Delta x_{0i}, \Delta y_{0i}, \Delta z_{0i}$ – составляющие перемещения вершины резца в промежуток времени $t-t''$ в системе координат $Oxyz$, связанной с коронкой в текущий момент времени;

$n_{р.лр.}$ – число резцов в линии резания;

V_{xi}, V_{yi}, V_{zi} – составляющие переносной скорости вершины резца в системе координат $Oxyz$, связанной с коронкой;

x_{ci}, z_{ci} – координаты вершины резца в системе $BX'YZ$;

$\bar{\Delta}\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i\}$ – вектор смещения вершины резца в системе координат $Oxyz$ в промежуток времени $t-t''$;

x'_{ki}, y'_{ki}, R_{ki} – координаты точек центров k -тых окружностей формирования поверхности забоя для i -го резца в плоскости $X'BZ$ и радиусы этих окружностей;

$\bar{n}_{yi}, \bar{n}_{zi}, \bar{n}_{xi}$ – единичные векторы, соответственно: перпендикулярный поверхности забоя (противоположен усилию подачи резца на забой), совпадающий с усилием резания (противоположно направленный скорости резания), совпадающий с боковым усилием на резце;

h_i – толщина стружки;

N_k – количество поверхностей образующих забой при предыдущих резах;

$\delta\beta_i, \delta\alpha_i, \delta\gamma_i$ – кинематические изменения соответственно заднего, переднего и бокового углов резца.

С учетом расчетных схем (рисунок 2, рисунок 3) была составлена математическая модель определения толщины стружки и кинематических изменений углов резца (1).

$$\begin{aligned}
 L_B(t) &= \int_0^t V_B dt; \quad \beta(t) = \int_0^t \omega_\beta dt; \quad \alpha(t) = \int_0^t \omega_\alpha dt; \\
 a_i &= L_{CT} + L_B + r_i \sin(\varphi_i - \alpha); \quad b_i = r_i \cos(\varphi_i - \alpha); \\
 x'_{Ci} &= L_0 + a_i \cos \alpha - b_i \sin \alpha; \quad z'_{Ci} = a_i \sin \alpha + b_i \cos \alpha; \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 k = 1, N_k : R_{ki} = R_k, \quad \text{при } \beta < \beta_3; \\
 R_{ki} = f(y_i - B_3 \sin \beta), \quad \text{при } \beta_3 < \beta; \\
 x'_{ki} = L_0 - B_3 \cos \beta + (L_{CT} + L_{Bi}) \cos \alpha_{ki}; \quad z'_{ki} = (L_{CT} + L_{BK}) \sin \alpha_{ki}; \\
 IF(x'_{ki} - x'_{Ci})^2 + (z'_{ki} - z'_{Ci})^2 \leq R_{ki}^2, \quad \text{то } h_i = \delta\beta_i = \delta\alpha_i = \delta\gamma_i = 0, \text{ end.}
 \end{array} \right. \\
 t'' &= t - 2\pi / \omega n_{p.lp}; \\
 \Delta\beta_i &= \beta(t) - \beta(t''); \quad \Delta\alpha_i = \alpha(t) - \alpha(t''); \quad \Delta L_B = L_B(t) - L_B(t''); \\
 \Delta x_{0i} &= -(y_0 + y_i) \Delta\beta_i - b_i \Delta\alpha_i + \Delta L_B; \quad \Delta y_{0i} = x_{Ci} \Delta\beta_i; \quad \Delta z_{0i} = a_i \Delta\alpha_i; \\
 V_{xi} &= -(y_0 + y_i) \omega_\beta + b_i \omega_\alpha + V_B; \quad V_{yi} = x_{Ci} \omega_\beta; \quad V_{zi} = a_i \omega_\alpha; \\
 t' &= t'' - \frac{\Delta x_{0i} \cos \varphi_i - \Delta z_{0i} \sin \varphi_i}{\omega r_i + v_{xi} - v_{zi}}, \quad \bar{\Delta} \{ \Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i \} \quad (1) \\
 \Delta\beta_i &= \beta(t) - \beta(t'); \quad \Delta\alpha_i = \alpha(t) - \alpha(t'); \quad \Delta L_B = L_B(t) - L_B(t'); \\
 \Delta x_i &= (y_0 + y_i) \Delta\beta_i - a_i \Delta\alpha_i \sin \alpha_i + \Delta L_B; \quad \Delta y_i = (y_0 + y_i) \Delta\beta_i; \\
 \Delta z_i &= a_i \Delta\alpha_i \cos \alpha_i; \\
 \bar{n}_{xi} &\{ \sin \alpha \sin \varphi_i; -\cos \alpha; \sin \alpha \cos \varphi_i \} \\
 \bar{n}_{yi} &\{ \cos \alpha \sin \varphi_i; \sin \alpha; \cos \alpha \cos \varphi_i \} \quad \bar{n}_{zi} \{ -\cos \varphi_i; 0; \sin \varphi_i \} \\
 h_i &= \bar{\Delta} \cdot \bar{n}_{yi}. \\
 \delta\beta_i &= -\frac{\bar{v} \cdot \bar{n}_{yi}}{\omega r_i + \bar{v}_i \cdot \bar{n}_{zi}}; \quad \delta\alpha_i = -\Delta\beta_i; \quad \delta\gamma_i = \frac{\bar{v} \cdot \bar{n}_{xi}}{\omega r_i + \bar{v} \cdot \bar{n}_{zi}}, \text{ end.}
 \end{aligned}$$

Величина удельных энергозатрат на разрушение массива коронкой W и составляющих вектор внешнего возмущения (M, P_x, P_y, P_z) в функции угла поворота коронки φ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) определяется по зависимости (2).

Здесь: $\bar{P}_{xi}, \bar{P}_{yi}, \bar{P}_{zi}$ - составляющая силы резания на i -ом резце в системе координат $Oxyz$ в функции угла поворота коронки φ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$); A_i - соответственно работа, затрачиваемая на разрушение объема массива V_i i -тым резцом за один оборот коронки; ϕ - угол поворота коронки; W_i - удельные энергозатраты i -го резца.

$$P_{zi} = f_1(\varphi, h_i, \delta\alpha_i, \delta\beta_i, \delta\gamma_i, P_k(A_p));$$

$$P_{yi} = f_2(\varphi, h_i, \delta\alpha_i, \delta\beta_i, \delta\gamma_i, P_k(A_p));$$

$$P_{xi} = f_3(\varphi, h_i, \delta\alpha_i, \delta\beta_i, \delta\gamma_i, P_k(A_p));$$

$$A_i = \omega r_i \int_0^{2\pi} z_i(\varphi) d\varphi; \quad V_i = t_i r_i \int_0^{2\pi} h_i(\varphi) d\varphi; \quad W_i = \frac{A_i}{V_i}; \quad W = \frac{\sum_{i=1}^k A_i}{\sum_{i=1}^k V_i};$$

$$\bar{P}_{zi} = \{-P_{zi} \cos \varphi_i; 0; P_{zi} \sin \varphi_i\};$$

$$\bar{P}_{yi} = \{P_{yi} \cos \delta_i \cos \varphi_i; P_{yi} \sin \delta_i; P_{yi} \cos \delta_i \sin \varphi_i\};$$

$$\bar{P}_{xi} = \{P_{xi} \sin \delta_i \cos \varphi_i; P_{xi} \cos \delta_i; P_{xi} \sin \delta_i \sin \varphi_i\};$$

$$M = \sum_{i=1}^n P_{zi} r_i \tag{2}$$

$$P_{xi} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_{zi} \bar{n}_{xi} + \bar{P}_{yi} \bar{n}_{xi} + \bar{P}_{xi} \bar{n}_{xi};$$

$$P_{yi} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_{zi} \bar{n}_{yi} + \bar{P}_{yi} \bar{n}_{yi} + \bar{P}_{xi} \bar{n}_{yi};$$

$$P_{zi} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_{zi} \bar{n}_{zi} + \bar{P}_{yi} \bar{n}_{zi} + \bar{P}_{xi} \bar{n}_{zi};$$

Выводы:

1. Особенностью работы аксиальных коронок является большое число возможных режимов обработки забоя, которые характеризуются: существенным отличием конфигурации и величины площади обрабатываемого сечения; наличием режимов работы резцов с малым радиусом установки; влиянием формы и схемы обработки забоя на вид и параметры обрабатываемого сечения; существенными кинематическими изменениями углов резцов на малом радиусе их установки.

2. Разработанная математическая модель позволяет получить основные количественные характеристики (энергопотребление и неравномерность составляющих вектора внешней нагрузки коронки), определяющие эффективность работы проходческих комбайнов по основным качественным показателям – производительность и долговечность.

Модель может быть использована для обоснования параметров аксиальной коронки.